

# Standortbestimmung und Integration von ITS Roadside Stations für die Anwendungsplattform Intelligente Mobilität

Tobias Frankiewicz\*      Arno Hinsberger<sup>†</sup>      Tobias Lorenz\*  
Hans-Josef Hilt<sup>†</sup>      Sebastian Weber<sup>†</sup>      Horst Wieker<sup>†</sup>  
Frank Köster\*

\*Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)  
Institut für Verkehrssystemtechnik  
Lilienthalplatz 7, 38108 Braunschweig  
Tel.: (0531) 295 - 3401, Fax: (0531) 295 - 3402  
E-Mail: {tobias.frankiewicz, tobias.lorenz, frank.koester}@dlr.de

<sup>†</sup>Hochschule für Technik und Wirtschaft des Saarlandes (HTW)  
Forschungsgruppe Verkehrstelematik  
Altenkessler Straße 17/D2, 66115 Saarbrücken  
Tel.: (0681) 5867 - 195, Fax: (0681) 5867 - 122  
E-Mail: {hans-josef.hilt, arno.hinsberger, sebastian.weber, wieker}@htw-saarland.de

9. Februar 2011

## Kurzfassung

Das Institut für Verkehrssystemtechnik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt baut derzeit eine neue Großforschungsanlage auf, welche die anwendungsnahe Erforschung und Entwicklung intelligenter Verkehrs- und Mobilitätsdienste in einem urbanen Kontext ermöglichen wird. Ein wesentlicher Bestandteil der *Anwendungsplattform Intelligente Mobilität* ist die Ausstattung bestimmter Streckenabschnitte mit ITS Roadside Stations für die Vehicle-to-Infrastructure-Kommunikation. Für die Planung der Standorte der ITS Roadside Stations sind Messungen, aus denen die zu erwartenden Kommunikationsreichweiten hervorgehen, unerlässlich.

Dieser Beitrag erläutert den Systemaufbau der zu installierenden Komponenten und präsentiert anschließend ein Konzept zur qualitativen Beschreibung der Ausleuchtung unterschiedlicher Straßenzüge. Dieses wird exemplarisch auf eine zu vermessende Kreuzung angewandt.

# 1 Einleitung und Motivation

Mit der *Anwendungsplattform Intelligente Mobilität* (AIM) entsteht aktuell eine Großforschungsanlage für den Bereich der Intelligenten Mobilitätsdienste. Diese besitzt wesentliche Anteile im realen Umfeld einer Stadt sowie ausgewählter umliegender Regionen, spezielle Teststrecken und ein leistungsfähiges Instrumentarium zur Simulation und Beeinflussung makroskopischer (z.B. Verkehrsflüsse) und mikroskopischer (z.B. Fahrverhalten) Aspekte von Verkehr und Mobilität.

AIM ermöglicht dabei sowohl Arbeiten mit hohem systemischen Anspruch als auch von herausragender fachlicher Tiefe und wird vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) in Partnerschaft mit dem Land Niedersachsen, der Stadt Braunschweig und weiteren Akteuren aus Wissenschaft, Industrie und öffentlicher Hand aufgebaut.

Ein wichtiger Bestandteil von AIM ist die Ausstattung einer Referenzstrecke in der Stadt Braunschweig mit Infrastrukturkomponenten für die Vehicle-to-Infrastructure-Kommunikation (V2I), den sogenannten ITS<sup>1</sup> Road Side Stations (IRS). Die IRS dienen einerseits der Bereitstellung von Daten über angeschlossene Lichtsignalanlagen (LSA) und Informationen einer Verkehrsmanagementzentrale für Fahrzeuge, andererseits auch der Bereitstellung von Informationen für weitere Verkehrsteilnehmer (z.B. Fußgänger, Radfahrer und Nutzer öffentlicher Verkehrsmittel) über etablierte WLAN-Standards<sup>2</sup>. Des Weiteren werden einige IRS Daten von angeschlossenen Sensoren der Infrastruktur erfassen (z.B. von Kameras, Laserscannern, Radarsensoren) und diese auf integrierten Applikationsrechnern weiter verarbeiten. Bei Bedarf können die aufbereiteten Daten dann über V2I-Kommunikation direkt an die Fahrzeuge oder über eine Datenverbindung (z.B. über Ethernet oder Mobilfunk) an eine Verkehrsmanagementzentrale übertragen werden. Somit lassen sich neuartige Fahrerassistenzsysteme, die auf V2I-Kommunikation basieren, entwickeln und einfach im Feld testen.

Aus der Sicht des Kommunikationssystems im Fahrzeug (ITS Vehicle Station, IVS) verhält sich eine IRS wie ein stehendes Fahrzeug. So kann eine IRS beispielsweise relevante Informationen in ihrem Abdeckungsgebiet vorhalten, die ursprünglich von anderen Fahrzeugen generiert wurden. Dieser *Store and Forward* Mechanismus wird insbesondere für eine erfolgreiche Einführungsphase von Fahrzeug-Ad-Hoc-Netzwerken von großer Wichtigkeit sein, um die dann noch geringe Durchdringungsrate der Technologie an strategisch relevanten Stellen teilweise kompensieren zu können.

Eine IRS ist grundsätzlich eine flexible Plattform für beliebige Anwendungen, die mit Fahrzeu-

---

<sup>1</sup>Intelligent Transport Systems

<sup>2</sup>IEEE 802.11b/g/n

gen und der Infrastruktur kommunizieren [3]. Entsprechend ihrer Anwendungskonfiguration können diese Systeme an unterschiedlichen Orten installiert werden. Der Einsatz von IRS-Systemen im Autobahnumfeld wurde beispielsweise bereits im Forschungsprojekt AKTIV-VM<sup>3</sup> eingehend untersucht. Das Projekt simTD<sup>4</sup> erweitert die Untersuchungen auf ländliche und vor allem städtische Gebiete. Für die Konzeption entsprechender ITS-Anwendungen und die Parametrisierung des Sendeverhaltens der IRS ist die Ausleuchtungscharakteristik des jeweiligen Standorts eine wichtige Eingangsgröße. Bei allen genannten Szenarien kann man grundsätzlich davon ausgehen, dass das Ausbreitungsverhalten des Signals sehr komplex ist. Benachbarte Fahrzeuge zwischen Sender und Empfänger führen zu hoch dynamischen Abschattungen, die sich mit denen stationärer Objekte, z.B. Gebäude, überlagern, während beispielsweise größere Verkehrsschilder situativ als Reflektoren agieren.

Sowohl in der Konzeptionsphase von AIM als auch im späteren operativen Betrieb der IRS sind Ausleuchtungsmessungen für die Wahl eines geeigneten Standortes von großer Wichtigkeit. Um beispielsweise mit einer IRS an einer Kreuzung mehrere Zufahrtsrichtungen gleichberechtigt versorgen zu können, sind entsprechende Messungen für die Bestimmung des Standortes notwendig, um etwa auf Basis des noch zu erforschenden Kanalmodells weitergehende Ausbreitungssimulationen vorzunehmen.

Dieser Beitrag beschreibt zunächst den Aufbau einer IRS und die Integration in die Gesamtarchitektur des Testfeldes von AIM und erläutert anschließend ein neu entwickeltes, auf Messungen basierendes Konzept, um die Abdeckung unterschiedlicher Straßenzüge qualitativ zu beschreiben. Dieses Konzept wird exemplarisch auf eine innerstädtische Kreuzung angewandt, um dessen Eignung zu zeigen.

## 2 Aufbau einer ITS Roadside Station

Abbildung 1 zeigt den Aufbau einer IRS schematisch. Diese besteht aus den folgenden Komponenten:

- Application Unit (AU) für die Verarbeitung von Daten und zur Kommunikation mit der Verkehrsmanagementzentrale, diese wird i.d.R. räumlich von den restlichen Komponenten getrennt sein
- Communication and Control Unit (CCU) für die V2I-Kommunikation
- GPS-Empfänger als Positions- und Zeitreferenz

---

<sup>3</sup>Aktive und Kooperative Technologien für den Intelligenten Verkehr

<sup>4</sup>Sichere Intelligente Mobilität - Testfeld Deutschland

- Anbindung an die Verkehrsmanagementzentrale (VMZ), z.B. über Ethernet
- Anbindung an die Lichtsignalanlage über ein spezielles Interface (Ersatzweise über VMZ)
- optional, je nach Standort:
  - weitere Kommunikationsmodule, z.B. Wireless LAN
  - Anbindung an Sensoren, z.B. Laserscanner

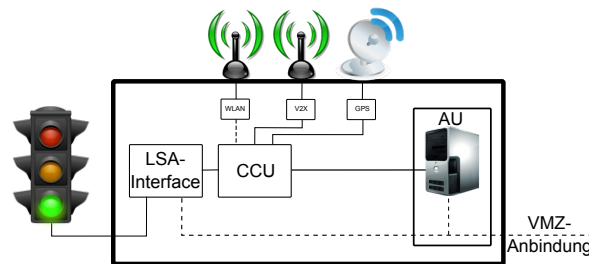


Abbildung 1: Aufbau einer ITS Roadside Station

### 3 Auswahl von IRS-Standorten

Als Referenzstrecke wurde aus verschiedenen, vorwiegend verkehrlichen Gründen, der Ring um die Braunschweiger Innenstadt gewählt. Abbildung 2 zeigt den Verlauf dieser Referenzstrecke und die bereits vermessenen IRS-Standorte. Die wichtigsten Daten, die von den IRS bereitgestellt werden sollen, sind die Signalzustände der Lichtsignalanlagen (LSA) entlang der Referenzstrecke. Die Signalmasten der LSA bieten i.d.R. durch bereits vorhandene Leitungen eine gute Möglichkeit der Energieversorgung für ITS-Komponenten. Aus Sicht der Ausbreitungsbedingungen für die Funksignale eignen sich die LSA-Masten aufgrund der Höhe und des freien Sichtfeldes in die Kreuzung ebenfalls gut. Aus diesen Gründen sollen die IRS vorwiegend an den Signalmasten der Kreuzungen entlang der Referenzstrecke installiert werden.

Die vorläufige Bestimmung der IRS-Standorte wurde auf der Grundlage von Kartenmaterial und Luftbildern entlang der Referenzstrecke durchgeführt. Abschätzungen über die Anzahl und die Abstände der einzusetzenden IRS wurden anhand der zu erwartenden Kommunikationsreichweiten getroffen. Aufgrund der hohen Frequenz wurde unter Annahme ungünstiger Bedingungen zunächst ein Abstand von 300 m gewählt. Nach dieser Abschätzung wären für die Ausleuchtung des gesamten Ringes etwa 50 IRS notwendig.

Die Anzahl der tatsächlich benötigten IRS und die Positionen der einzelnen Standorte kann

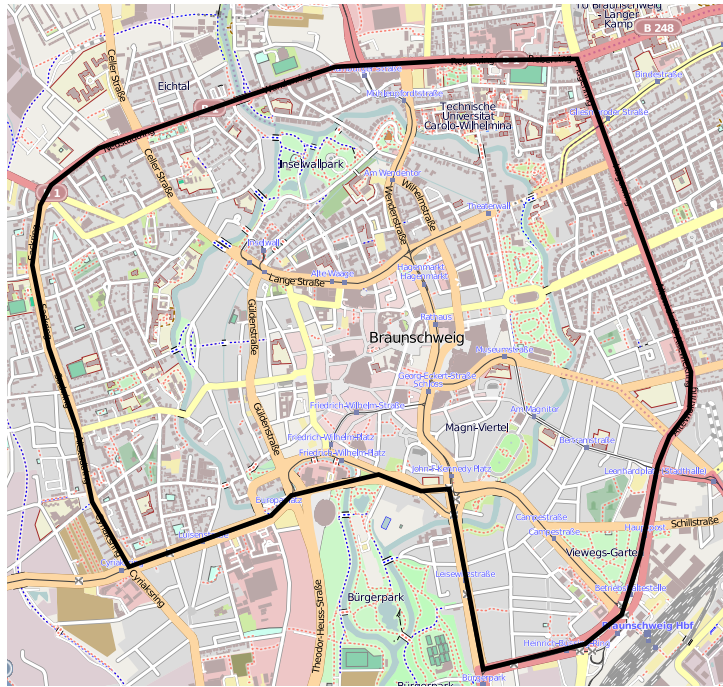


Abbildung 2: AIM-Referenzstrecke entlang des Braunschweiger Stadtrings

jedoch erst nach der Durchführung von Referenzmessungen erfolgen, da die Ausbreitung der Funksignale im Bereich von 5,9 GHz sehr komplexen Regeln folgt und nur mit hohem Simulationsaufwand präzifizierbar ist.

## 4 Konzeption der Messungen

Wie eingangs bereits beschrieben fehlt es derzeit noch an einem standardisierten und allgemein anerkannten Kanalmodell für Fahrzeug-Ad-Hoc-Netzwerke. Viele Simulationen, z.B. [2] und [8], basieren beispielsweise auf dem Nakagami-m-Fading-Modell [7], um neben dem Pfadverlust auch das Fast Fading zu modellieren. Solche Modelle sind für Simulationen durchaus geeignet, weil hier je nach Anwendungsbereich nur typische, mittlere Ausbreitungsbedingungen für Autobahnen, Land- oder Stadtstraßen notwendig sind. Um aber die Messungen einzelner Straßenzüge miteinander vergleichen zu können, müsste das Modell jeweils neu parametrisiert werden, um nicht nur durchschnittliche Bedingungen, sondern das tatsächliche Kanalverhalten jeder Ausbreitungsrichtung möglichst genau nachbilden zu können. Aufgrund der Komplexität dieser Modelle wäre diese Parametrisierung jedoch vergleichsweise aufwendig. Daher erscheinen sie für die Auswertung großer Messreihen wenig praktikabel.

Die Auswertungen groß angelegter Messkampagnen basieren daher häufig auf dem relativ überschaubaren *Log-Distance-Path-Loss-Model* [4], [5]:

$$PL\left(\frac{d}{d_0}\right) = PL_0 + 10 \cdot n \cdot \left(\frac{d}{d_0}\right) + X \quad (1)$$

mit:

$PL$  zu bestimmender Pfadverlust (Path Loss)

$d$  Abstand vom Sender

$d_0$  normierter Abstand (1 m)

$PL_0$  Pfadverlust in 1 m Abstand vom Sender ( $PL_0 = 47,8$  dBm)

$n$  Pfadverlustexponent

$X$  normalverteilte Zufallsgröße mit Standardabweichung  $\sigma$  und Mittelwert  $\mu = 0$

Dabei repräsentiert die normalverteilte Zufallsgröße  $X$  den durch das Fading beigetragenen Verlustanteil, während der Pfadverlustexponent den durch die Distanz zum Sender hervorgerufenen Pfadverlust bestimmt (bei der idealen Freiraumdämpfung ist  $n = 2$ ). Der Pfadverlustexponent ist also geeignet, um die Ausbreitungsbedingungen qualitativ zu beschreiben und kann somit beispielsweise für den Vergleich unterschiedlicher Straßenzüge verwendet werden.

Eine weitere wichtige Kenngröße ist die Verlustrate der während der Messung ausgetauschten Nachrichten. Es ist intuitiv, dass insbesondere Abschattungen zu eklatanten Einbrüchen des Empfangssignals führen können. Sofern aber die Distanz zwischen Sender und Empfänger noch vergleichsweise gering ist, liegt das Empfangssignal dennoch oftmals deutlich über der Empfängersensitivität (bzw. der Dekodersensitivität), sodass die zugehörigen Informationen nicht verloren sind. Ist die Sender-Empfängerdistanz hingegen groß, sind derartige Signaleinbrüche nicht mehr tolerabel und führen zu Nachrichtenverlusten. Entsprechend ist es durchaus möglich, dass man auch für vom Sender weiter entfernte Positionen aus den noch empfangenen Paketen durchaus einen guten Pfadverlustexponenten berechnen kann, allerdings viele Pakete zwischenzeitlich verloren gehen. Daher ist die Verlustrate von Nachrichten neben dem Pfadverlustexponenten für eine möglichst umfassende Beschreibung des Kanalverhaltens unverzichtbar.

Insbesondere für das städtische Ausbreitungsszenario ist zu erwarten, dass sich der Kanal entlang einer Straße nicht konstant, sondern variant verhält. Daher wird der Straßenzug in einzelne Segmente unterteilt und der Kanal jeweils durch den mittleren Pfadverlustexponenten und die mittlere Verlustrate beschrieben. Gemäß Formel 1 lässt sich der durchschnittliche Pfadverlustexponent für das jeweilige Straßensegment aus den gemessenen Empfangsfeldstärken und Sender-Empfängerdistanzen bestimmen:

$$\bar{n} = \frac{\sum_{i=1}^N \left( \frac{PL_i - PL_0}{10 \cdot \log\left(\frac{d_i}{d_0}\right)} \right)}{N} \quad (2)$$

mit:

- $\bar{n}$  durchschnittlicher Pfadverlustexponent für das Segment
- $PL_i$  Pfadverlust an der Stelle i im Segment
- $PL_0$  Pfadverlust im Abstand von 1 m zum Sender
- $d_i$  Abstand zwischen Sender und Empfänger an der Stelle i
- $d_0$  normierter Abstand (1 m)
- $N$  Gesamtanzahl der Messpunkte im Segment

Die Standardabweichung der Empfangsleistung für das jeweilige Straßensegment berechnet sich wie folgt:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N ((rx_i - \mu)^2)}{N}} \quad (3)$$

mit:

- $\sigma$  Standardabweichung der Empfangsleistung im Segment
- $N$  Gesamtanzahl der Messpunkte im Segment
- $rx_i$  Empfangsleistung an der Stelle i im Segment
- $\mu = \frac{\sum_{j=1}^N rx_j}{N}$  mittlere Empfangsleistung im Segment

## 5 Messaufbau

Um das beschriebene Konzept zu validieren, wurden vom DLR und der HTW gemeinsam eine Reihe von ausgesuchten Kreuzungen in Braunschweig vermessen. In der Folge soll der dargestellte Ansatz als Grundlage für die Standortbestimmung der für AIM zu installierenden IRS eingesetzt werden. Für die bereits durchgeführten Messungen wurde der nachfolgend beschriebene Aufbau verwendet.

Als Kommunikationssystem wurden NEC LinkBird-MX v3 mit dem zugehörigen c2xd (C2X-SDK v.1.5.2) verwendet. Hierbei handelt es sich um ETSI-G5 Prototypen, die auf den aktuellen europäischen Standards und Standardentwürfen des ETSI TC ITS und den Empfehlungen des C2C-CC basieren. Demzufolge tauschen die Endgeräte spontan und zyklisch auf dem Netzwerklayer Informationen über ihren Positionsvektor und Status aus. Sofern der Facility Layer keine CAMs<sup>5</sup> sendet, in deren NET-Header die entsprechenden Informationen eingefügt sind, werden dazu eigene Netzwerklayer-Beacons versendet. Da die Wiederholrate dieser Beacons konfigurierbar ist, kann anhand der Zeitstempel in den Logs des Empfängers sofort auf verlorene Nachrichten zurückgeschlossen werden.

---

<sup>5</sup>Cooperative Awareness Message

Da in den Logeinträgen dieser Nachrichten alle benötigten Informationen enthalten sind, konnte für die Messauswertung auf die entsprechenden Logdateien zurückgegriffen werden. Im Einzelnen sind neben der Sender- und Empfängerpositionen auch die Empfangsleistungen relevant, die aus dem RSSI-Wert gewonnen werden können (hier Rx-power = RSSI -95). Tabelle 1 listet die wichtigsten Parameter auf<sup>6</sup>.

Parameter	Wert	Einheit
Mittenfrequenz (ch. 178)	5,89	GHz
Kanalbandbreite	10	MHz
Wiederholrate NET-Layer Beacons	2	Hz
Sendeleistung	15	dBm
Gewinn Sendeantenne	8,0	dBi
Gewinn Empfangsantenne	2,5	dBi
Kabelverlust Senderseite	-3,0	dB
Kabelverlust Empfängerseite	-2,5	dBi

Tabelle 1: Einstellungen und Eigenschaften

Um möglichst eine möglichst genaue Auswertung der Messdaten zu ermöglichen, wurde die Sendeleistung der verwendeten Kommunikationssysteme messtechnisch bestimmt. Das Spektrum des Ausgangssignals ist in Abbildung 3 dargestellt.

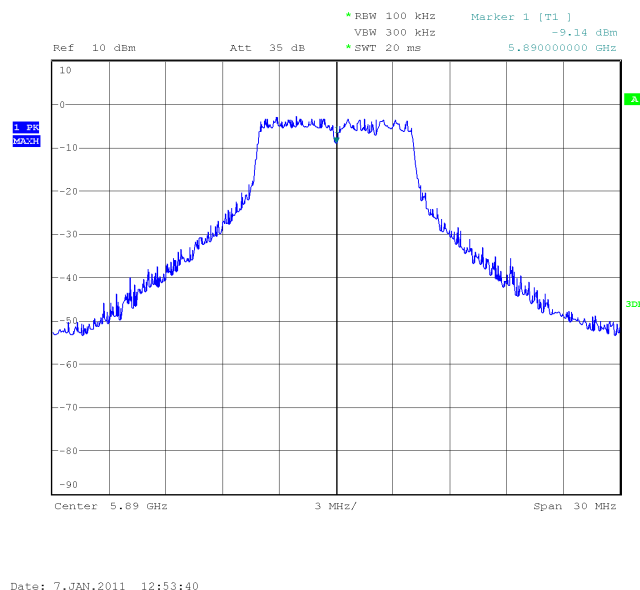


Abbildung 3: Spektrum des Ausgangssignals des NEC Linkbird

<sup>6</sup>Die in der Tabelle genannten Kabelverluste bezeichnen die tatsächlich gemessenen Verluste inkl. aller Adapter und Steckverbinder



$$p_{tx} = \bar{p} - l + 10 \cdot \lg \left( \frac{CHBW}{RBW} \right) \quad (4)$$

mit:

- $p_{tx}$  Ausgangsleistung
- $\bar{p}$  Mittlere Leistung aus den Messpunkten zwischen 5,89 GHz und 5,95 GHz (hier: -7,6dBm)
- $CHBW$  Kanalbandbreite (hier: 10 MHz)
- $RBW$  Auflösungsbandbreite des Spektrum-Analysators (hier: 10 kHz)
- $l$  Verlust des Messaufbaus (hier: 2,6 dBm)

Das Kommunikationssystem für die IRS wurde in einem wasserfesten Gehäuse an einem Dreibein-Stativ befestigt und die darauf verschraubte Antenne somit auf ca. 3,5 m Höhe gebracht. Dieses System wurde, von einer Fahrzeugbatterie gespeist, am zu vermessenden IRS-Standort platziert. In Abbildung 4 ist dieser Aufbau ersichtlich.



Abbildung 4: Mobile IRS für die Referenzmessungen

Das zweite Kommunikationssystem wurde in einem Fahrzeug verbaut und mit einer speziellen Dachantenne verbunden. Abbildung 5 zeigt den Aufbau im Fahrzeug der HTW. Dieses Fahrzeug fuhr in der Folge, ausgehend vom geplanten Standort der IRS, die einzelnen Zufahrtsstraßen der Kreuzung ab. Die Messdaten der IRS wurden für jeden einzelnen Straßenzug via Standard-WLAN auf die fahrzeugseitige Rechneinheit gesichert.



Abbildung 5: Messsystem im Versuchsfahrzeug der HTW

## 6 Exemplarische Analyse der Messdaten

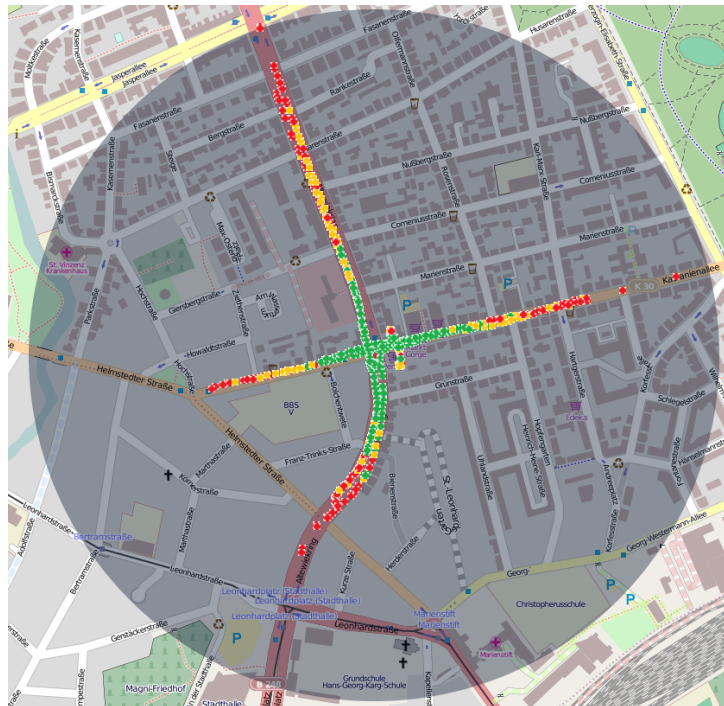
Das eingangs beschriebene Konzept für die Auswertung der Meßdaten soll exemplarisch auf die Kreuzung Altewiekring – Kastanienallee (Braunschweig) angewandt werden. Zunächst wurde die für jeden Meßpunkt aufgezeichnete Empfangsleistung der Kommunikationssysteme auf eine Karte geplottet (siehe Abbildung 6). Dies ermöglicht eine visuelle Begutachtung der Ausleuchtung der Zufahrtsstraßen für den gewählten IRS-Standort. Wie an den folgenden Auswertungen zu erkennen ist, vermittelt diese vergleichsweise einfache Methode aber durchaus einen guten ersten Eindruck der Gesamtsituation an der Kreuzung. Allerdings sei auch an dieser Stelle erwähnt, dass die Verlustrate der Nachrichten im Plot nicht enthalten ist und somit ein wichtiges Bewertungskriterium fehlt.

Die Grafik in Abbildung 7 zeigt die gemessenen Empfangsleistungen (Fahrtrichtung Nord) in Abhängigkeit der Sender-Empfängerdistanz (blau) und die theoretische Empfangsleistung gemäß der Freiraumausbreitung (rot).

Auffällig ist die große Streuung der Empfangsleistung bei vergleichsweise geringen Sender-Empfängerdistanzen. Mit zunehmender Sender-Empfängerdistanz nimmt diese Streuung sogar ab. Ähnliche Erfahrungen wurden bereits bei Messungen für andere Anwendungsgebiete im 2,4 GHz Bereich gemacht [6]. Je näher Sender und Empfänger zueinander sind, desto größer ist der LoS<sup>7</sup>-Anteil an der Empfangsfeldstärke. Dieser Anteil nimmt mit größer werdender Distanz ab. Wenn also benachbarte Fahrzeuge die Sichtlinie zwischen Sender und Empfänger blockieren, führt dies bei kurzen Distanzen zu stärkeren Einbrüchen in der Empfangsleistung,

---

<sup>7</sup>Line of Sight



Empfangsleistung	Farbcodierung
$p_{rx} \geq -80 \text{ dBm}$	grün
$-87 \text{ dBm} \leq p_{rx} < -80 \text{ dBm}$	gelb
$p_{rx} < -87 \text{ dBm}$	rot

Abbildung 6: Plot der Empfangsleistung [1]

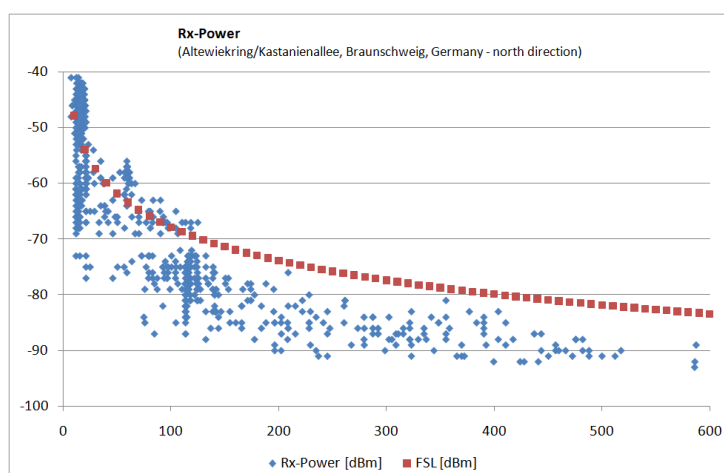


Abbildung 7: Gemessene Empfangsleistungen

als bei größeren Distanzen. Hinzu kommt, dass bei größeren Entfernungen zwischen Sender und Empfänger mit abgeschatteter Sichtverbindung, viele Nachrichten durch die zusätzliche Dämpfung gar nicht mehr empfangen werden, was dazu führt, dass die zugehörigen Messpunkte gar nicht mehr auftauchen. Bei allen Messreihen war entsprechend zu beobachten, dass die Varianz bzw. die Standardabweichung von der mittleren Empfangsfeldstärke mit zunehmender Sender-Empfängerdistanz abnimmt.

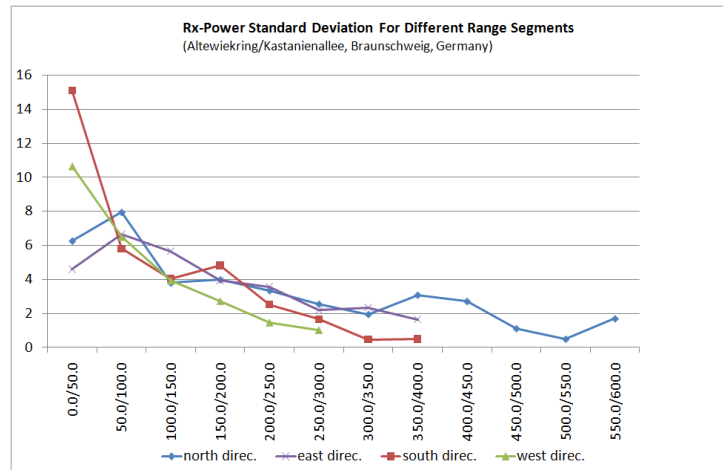


Abbildung 8: Standardabweichungen der gemessenen Empfangsleistungen

Die Analyse der Verlustraten der gesendeten Nachrichten für die einzelnen Straßenzüge, gibt eindeutigen Aufschluss über die Ausleuchtungssituation der betrachteten Kreuzung (Abbildung 9). In Fahrtrichtung Nord und Ost liegen die Verlustraten im Segment bis 250 m um die 10%. In den übrigen Fahrtrichtung ist dies hingegen nur noch im Segment bis 150 m der Fall. Im weiteren Verlauf ist zu erkennen, dass die Verlustrate für die Fahrtrichtung Ost im Segment bis 300 m um die 50% liegt; für die Fahrtrichtung Nord gilt dies sogar noch im Segment bis 450 m. Die Fahrtrichtung West ist hingegen bereits im Segment bis 250 m deutlich über der 50% Verlustrate. In Fahrtrichtung Süd springt die Verlustrate im Segment bis 300 m sogar plötzlich von knapp 25% (im Segment bis 250 m) auf über 80%. Es ist also deutlich zu erkennen, dass die Fahrtrichtungen Nord und Ost von dem gewählten IRS-Standort aus recht gut abgedeckt werden können, wohingegen die übrigen Fahrtrichtungen gerade noch ausreichend ausgeleuchtet werden. Dieser Trend ist so grundsätzlich bereits aus dem Plot der Empfangsfeldstärke erkennbar.

Dieses Verhalten wird auch aus dem Verlauf der mittleren Pfadverlustexponenten über den einzelnen Segmenten der jeweiligen Zufahrtsrichtungen ersichtlich. Es ist vor allem erwähnenswert, dass der mittlere Pfadverlustexponent in den einzelnen Segmenten oftmals sogar direkt mit der Verlustrate verknüpft zu sein scheint. Wie eingangs dargelegt, muss diese Korrelation jedoch nicht zwangsläufig immer gegeben sein. Allerdings ist dies ein starkes Indiz für die Eignung des durchschnittlichen Pfadverlustexponenten als Bewertungskriterium für den Ausbreitungskanal in einem definierten Gebiet.

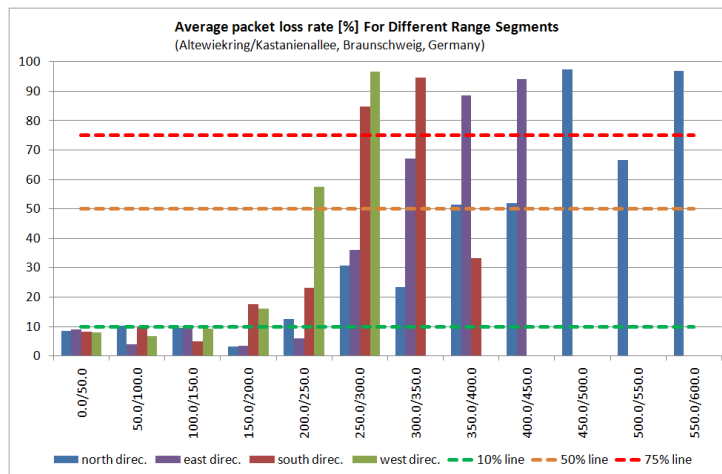


Abbildung 9: Durchschnittliche Paketverlustrate in den Segmenten der einzelnen Straßenzüge

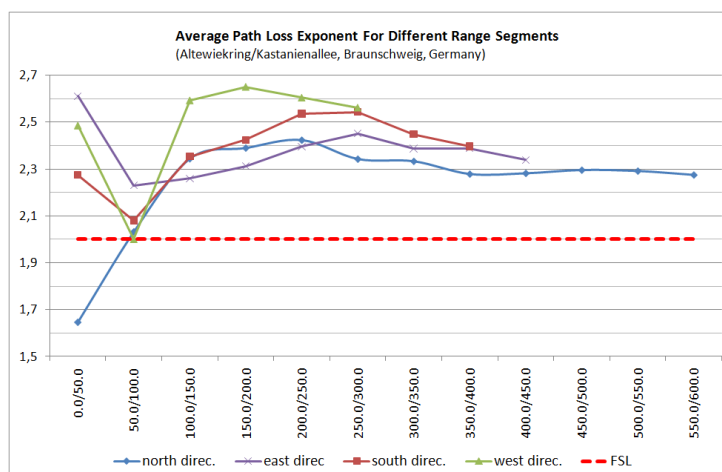


Abbildung 10: Durchschnittlicher Pfadverlustexponent

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

Dieser Beitrag ist durch die zur Bestimmung des optimalen IRS-Standorts notwendige Bewertung von Ausleuchtungsmessungen motiviert. Der Fokus liegt dabei hauptsächlich auf urbanen Szenarien, die naturgemäß die komplexesten Ausbreitungsbedingungen haben. Es ist offensichtlich, dass zur Begutachtung der Ausleuchtung einzelner Straßenzüge geeignete Kriterien benötigt werden, die die zugehörigen Messdaten qualitativ bewerten und somit vergleichbar machen. Der hier beschriebene Ansatz schlägt einen mittleren Pfadverlustexponenten in Verbindung mit der Nachrichtenverlustrate zur Beschreibung des Kanalverhaltens vor. Dieser Ansatz wurde anhand von Messungen im Stadtbereich von Braunschweig überprüft und anhand einer Kreuzung exemplarisch diskutiert.

Das Beispiel zeigt, dass die besagten Kriterien zur Bewertung der Ausleuchtungsqualität der einzelnen Zufahrtsrichtungen sehr gut geeignet sind. Auch die Erwartung, dass sich der Kanal entlang eines Straßenzuges stark variant verhält, hat sich in den Messungen bestätigt. Die Möglichkeit zur Unterteilung von Straßenzügen in grundsätzlich beliebig kleine Abschnitte (Segmente), rundet den Ansatz ab und verleiht ihm die notwendige Flexibilität hinsichtlich der Auflösung seiner Ergebnisse.

Das beschriebene Konzept stellt somit ein geeignetes Werkzeug für die Standortbestimmung von IRS bei Feldtests, aber durchaus auch für die spätere Aufbauphase von operativen Systemen in der Realität dar.

Aufbauend auf diesem Konzept werden weitere Messungen in Braunschweig durchgeführt, um die optimalen Standorte für die Gesamtheit der zu installierenden IRS ausfindig zu machen und die Anzahl der benötigten IRS zu bestimmen.

## Literatur

- [1] Quelle des kartenmaterials: Openstreetmap.
- [2] Festag, et al. On power aware greedy forwarding in highway scenarios. In *5th International Workshop on Intelligent Transportation (WIT)*, Hamburg, Germany, 2007.
- [3] Hinsberger, Arno et al. Benefits and technology of an intelligent roadside unit system for vehicle to infrastructure- and infrastructure to centre communication. In *Proceedings of 14th World Congress on Intelligent Transportation Systems*, Beijing, 2007.

- [4] Karedal et al. Path loss modelling for vehicle-to-vehicle communications. In *IEEE Transactions on Vehicular Technology* (ISSN: 0018-9545), 2010.
- [5] Kihl et al. Simulation modelling and analysis of a realistic radio channel model for v2v communications. In *International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT)*, 2010.
- [6] Prasad et al. 2ghz band experimental investigations of mobile communications over dense urban regions of india.
- [7] Suzuki. A statistical model for urban radio propagation. In *IEEE Transactions in Communications*, 1977.
- [8] Zhang et al. Simulation of nakagami fading channels with arbitrary cross correlation and fading parameters. In *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2004.